

半导体检测用近红外显微装置的研发

毛鹏程¹, 李洋², 杨通², 彭绍春¹

(北京理工大学 1.分析测试中心; 2.光电学院, 北京 100081)

摘要: 针对封装于半导体器件内部电子线路检测, 硅晶圆片内部缺陷、裂纹检测等应用场景, 开发了可穿透抛光硅片进行显微成像的近红外显微系统。系统研发过程综合分析了硅基半导体材料的透过率曲线及 CMOS 传感器的光谱响应曲线, 选定了最优的同轴照明波段, 在保证透过率的同时有效抑制了硅片表面强反射光对图像质量的影响。实验结果表明, 应用 CMOS 传感器相机搭配特定波段的照明及带通滤光片可透过抛光硅片实现内部电子线路的显微成像。相比于近红外波段常用的铟镓砷传感器, CMOS 传感器像素尺寸更小、靶面更大, 保证了分辨率和视场范围的同时提升。

关键词: 近红外显微镜; 半导体检测; 硅片内部成像; CMOS 相机

Development of A Near-infrared Microscope for Semiconductor Inspection

Mao Pengcheng¹, Li Yang², Yang Tong², Peng Shaochun¹

(1. Analysis & Testing Center, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A near-infrared microscope system which works at the wavelength silicon wafer is transparent is developed for inspection of defects, cracks and marks inside or on opposite side of wafer. In this home-made system, wavelength of the in-line illumination is optimized based on the transmission curve of silicon wafer and quantum efficiency of CMOS camera. The selected wavelength ensures a sufficient transmittance for imaging and suppresses the reflection from wafer surface effectively. The high-quality microscopy image of electronic circuits on opposite side of silicon chip is obtained by the experiment system with optimized illumination wavelength and well-designed bandpass filter. Compare to common used near-infrared InGaAs camera, CMOS camera has smaller pixel size and bigger detector size. These characters promote higher resolution and bigger inspection area of the near-infrared microscope system.

Key words: near-infrared microscope; semiconductor inspection; imaging inside silicon chip;

引言

近年来,我国芯片制造、半导体设备生产领域的发展逐步加快,国产半导体设备制造行业快速发展。2020年中国大陆半导体设备的销售额达187亿美元,超过中国台湾地区成为全球最大的半导体设备销售地区。^[1-2]以氮化镓、碳化硅为代表的宽禁带第三代半导体虽然发展十分迅猛,但在短期内依旧无法撼动硅基材料在半导体工业领域的绝对统治地位。中国工程院院士周济在近期接受采访时认为:半导体近期发展还要最大程度基于硅基材料。^[3-4]

针对不同的工艺流程及相应的测试精度要求,硅基半导体检测的手段多种多样,超声检测、光学成像、光学显微成像、显微红外热成像、电子显微镜成像等手段都有应用。^[5-10]各检测手段之中,光学显微成像具有快速、直观、无损伤、成本低等优势,应用最为广泛。单晶硅的带隙大小为1.12 eV,带隙宽度对应波长1100 nm光子所具有的能量,波长小于1100 nm的光子能量高于带隙,几乎无法穿透硅片。故常规的可见光显微镜仅能检测硅片表面的电子线路,无法应用于封装后的半导体器件。将光学显微系统的工作波段扩展至可穿透硅片的近红外区间,实现无损的芯片内部检测,可应用于半导体器件失效分析、半导体器件聚焦离子束(FIB)取样定位、封装后工艺流程检验等领域,有巨大的应用价值。

本文搭建了一套基于CMOS传感器相机的近红外显微成像系统。在相机选型、照明波长选取、成像滤光片选择、显微镜体积控制等方面做了理论分析及实验验证,确定了适用于穿透硅片成像的近红外显微系统的构建方案。搭建的系统实现了已封装芯片内部线路的显微成像,分辨率可达1微米以内。

1 近红外显微系统的设计研发

近红外显微系统的整体结构如图1所示,主要包括近红外显微物镜,近红外相机,近红外同轴照明光路,滤光及成像光路四个部分。每一部分的搭建和配置都需要结合待测物的光谱特性及尺寸特征。

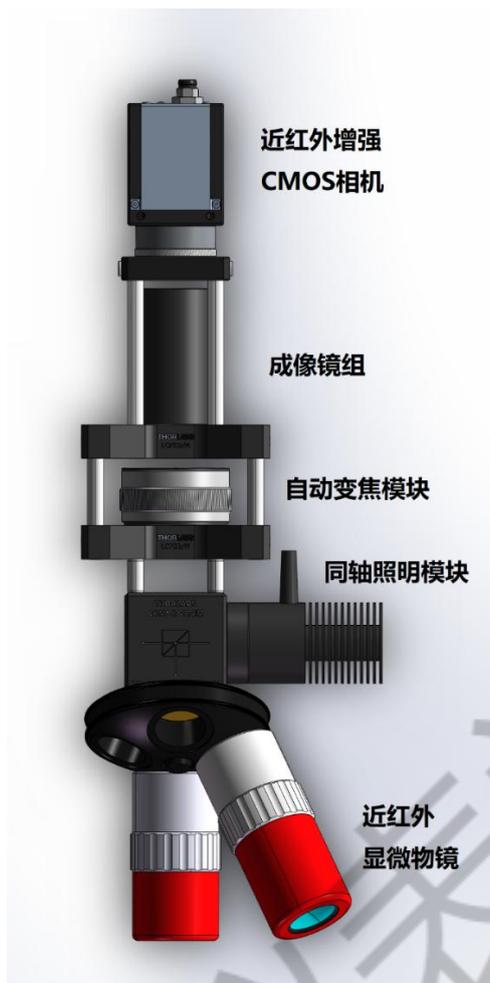


图 1 近红外显微系统结构示意图

1.1 近红外显微物镜

显微物镜为光学显微系统的核心部件，决定了系统工作波段及最终成像的分辨率。可见光显微物镜的设计波长通常在 400-700 nm 区间，无法在 1100 nm 波长附近使用。针对 1100 nm 以上近红外波段，三丰（Mitutoyo）和奥林巴斯（Olympus）生产的近红外波段校正显微物镜最为常见。三丰物镜的最大优势是其超长的工作距离，以其生产的高分辨率 100 倍红外显微物镜（M Plan Apo NIR HR 100X）为例，该款物镜的工作距离可达 10 mm，数值孔径（NA 值）为 0.7，按 1100 nm 波段计算成像分辨率约 960 nm，物镜质量 450 g，齐焦距离 95 mm，无硅片厚度补偿功能。奥林巴斯公司生产的红外显微物镜在工作距离方面较三丰物镜小很多，但在硅片厚度补偿、外形尺寸和分辨率上具有优势。其最高分辨率的 100 倍显微物镜（LCPLN100XIR）的工作距离仅 1.2 mm，NA 值达 0.85，按 1100 nm 波段计算成像分辨率约 790 nm，物镜质量 184g，齐焦距离 45mm。当显微镜观测区域上方有玻璃或硅片覆盖时，光束的折射会严重影响显微成像的质量，厚度补偿功能通过调整显微物镜内镜片的间距来弥补覆盖片的厚度，保证像质。为方便操作和适应更多种类的样品，我们选择了工作距离更大

的三丰近红外显微物镜搭建次系统。

1.2 近红外相机

将显微系统从可见光扩展至红外波段，需要一款能够感知近红外光的相机。根据成像波段不同，红外成像系统可使用 CMOS 或 CCD 相机(800-1100 nm)、铟镓砷相机(900-1700 nm)、碲镉汞相机 (>2000 nm)。^[11-13]图 2 为硅晶圆生产商 Sil'Tronix Silicon Technologies 在其官方网站给出的双面抛光硅晶圆的透过率曲线。根据透过率曲线可知，从 1000 nm 开始，逐渐有光子可以穿过硅晶圆，到 1200 nm 附近透过率达到极大值。铟镓砷相机在 1000-1700 nm 区间的量子效率可达 50%，而 CCD 和 CMOS 相机的最长波响应区段在 1100 nm 附近。基于硅的透过率特性，应用铟镓砷传感器制造的短波红外相机在半导体显微检测领域更为常用。^[14-17]应用 CCD 或 CMOS 传感器的相机往往只能用于晶圆表面检测。

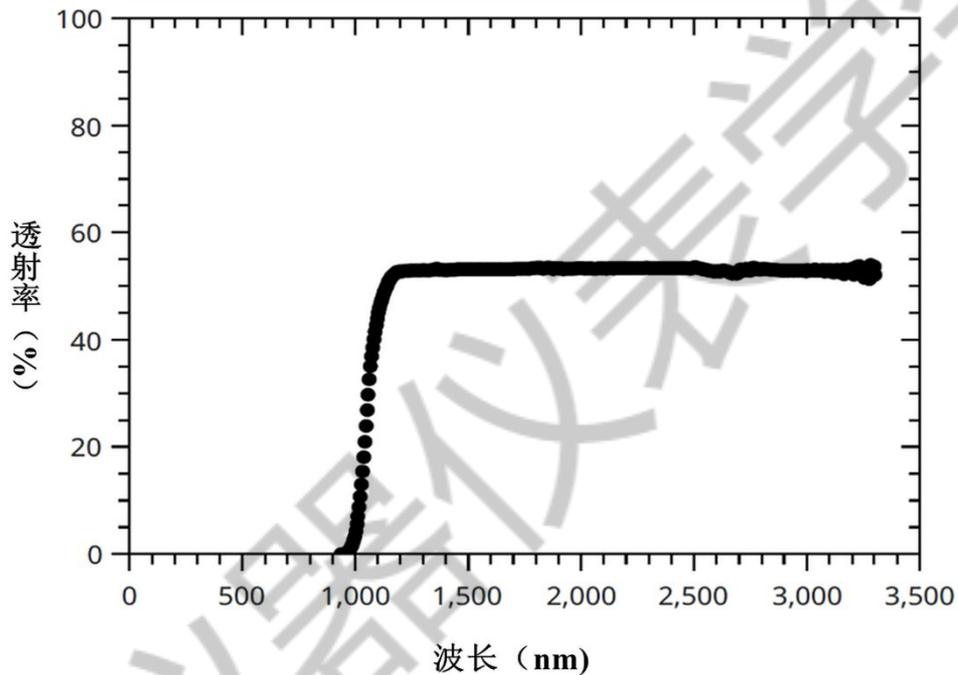


图 2 双面抛光 (double side polished, DSP) 硅晶圆的透过率曲线。(图片摘自 Sil'Tronix Silicon Technologies 官方网站。)

对于显微成像系统而言，相机传感器的像素尺寸应与成像光路的光学分辨率匹配。像素大小在瑞利判据计算得到的系统分辨率的 1/3 以内时，系统分辨率不受相机像素尺寸限制。由于铟镓砷传感器的生产制造工艺难度高，良品率低，目前国内市场可购得的铟镓砷相机的像素大小均为 $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ ，最高像素值 30 万像素，人民币售价在 20 万元左右。由于过大的像元尺寸和过低的像素数，应用铟镓砷相机搭建显微系统，相机会成为系统分辨率的限制因素。以实验使用的 20 倍显微物镜(LCPLN20XIR, Olympus)为例，其数值孔径 $\text{NA}=0.45$ ，

按照 1200 nm 的照明波长，根据瑞利判据算得的物方光学分辨率约 1.63 微米，乘以 20 倍放大率后像方投影大小 32.6 微米，像元尺寸在 11 微米以内时才不会造成像质损失。CCD 和 CMOS 传感器作为工业和民用相机的最主要传感器类型，其制造工艺成熟，像元尺寸可以做到一微米甚至更小，像素数和靶面大小选择范围大，根据配置的不同价格在几千元到一两万元不等。如果能解决其响应波段的问题，将会是近红外显微成像的最佳选择。图 3 给出了艾森美公司生产的近红外增强型 CMOS 传感器（Python 1300, Onsemi）的量子效率-波长对应曲线。从图片信息可知，近红外增强的 CMOS 传感器在 1050 nm 的量子效率为 2%，在 1100 nm 的量子效率降至 0.5% 以下。根据图 2 信息，硅晶圆在 1050 nm 的透过率约 20%，在 1100 nm 的透过率 40% 左右。根据这些数据可以判断，充分利用 1050-1100 nm 区间 CMOS 传感器的光谱响应及硅晶圆的透射光，可以将 CMOS 传感器相机用于近红外显微成像系统，实现硅基半导体芯片内部线路的无损观测。

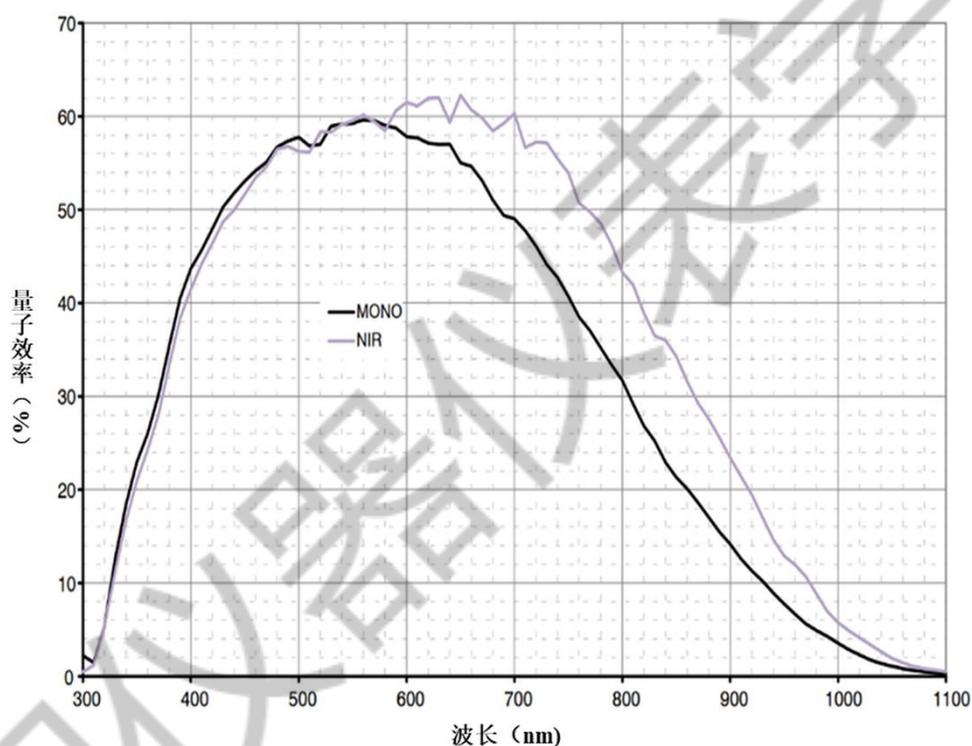


图 3 近红外增强型 CMOS 传感器（Python 1300, Onsemi）量子效率与波长的对应关系。图中紫线为 Python 1300 的响应曲线，黑线为未做近红外增强前传感器的量子效率-波长对应关系。（图片摘自 Onsemi 官方网站。）

1.3 近红外同轴照明光路

系统照明光路的确定主要包含照明光路结构设计和照明波长确定两个部分内容。

常见的显微系统照明光路结构包含透射照明和同轴反射照明两种形式。因封装完成的半

导体器件下方通常为不透光的电路板，应用透射照明可观测样品种类相对局限。同轴反射式照明利用成像显微物镜将照明光透射至观察区域，可对底部不透光样品成像，且显微物镜对照明光的汇聚作用可以保证观测区域的照明强度。故本近红外显微成像系统按照同轴反射照明设计光路。

照明波长选取部分，根据图 2 所示透过率信息，若照明波长小于 1050 nm，照明光大部分无法透过硅片。这些光会被硅片表面反射，直接投射到相机靶面上，严重影响显微成像质量。若照明波长接近 1100 nm，硅片表面的反射会明显降低，同时相机量子效率明显下降，只能通过增加照明光强和适当提高拍摄的积分时间来弥补量子效率的不足，保证成像质量。当积分时间超过 40 ms 时，帧率低于 25 帧，实验人员操作显微镜时会有卡顿感。系统搭建过程中，我们以中心波长 10 nm 为间隔，定制了 1050 nm 至 1100 nm 共计六颗单色 LED，每颗 LED 的发光亮度均在 150 mW 以上，发射光谱的半高宽不大于 30 nm。根据成像效果和积分时间比对，我们选择了中心波长 1080 nm 的 LED 进行最终系统的搭建。

1.4 滤光及成像光路

除照明 LED 波长限制以外，我们在成像光路中还添加了一片 1050 nm 高品质长波通滤光片。添加长波通滤光片可以有效降低硅片前表面反射的低波长照明杂光，同时还可以抑制室内照明光对系统工作的干扰。因半导体检测显微系统有集成到半导体测试设备的可能，我们在设计成像光路时对系统的体积进行了小型化处理。成像镜组使用远射式系统搭建，从检测面到相机尾部的总长 240 mm，配备单科物镜的显微系统质量小于 1 kg。

2 近红外显微系统的成像效果测试

系统研发过程中，我们在实验室搭建了系统样机进行参数选择调试和最终成像结果验证。搭建测试系统使用 10 倍及 20 倍近红外显微物镜，铟镓砷传感器近红外相机 (C14041-10U, Hamamatsu Photonics), 近红外增强型 CMOS 传感器相机 (acA1300-60gmNIR, Basler), 机械加工件、光学元器件、照明 LED 均为加工定制。测试系统照片如图 4 所示。

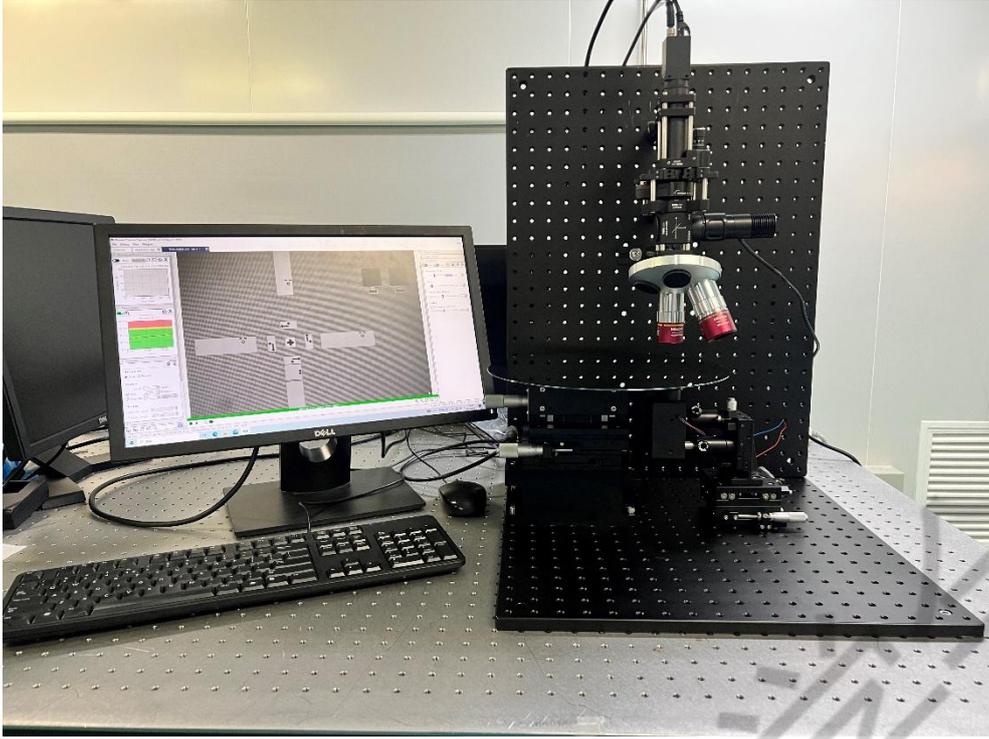


图4 近红外显微成像系统测试样机照片。

中国仪器仪表杂志



图5 验证近红外显微成像系统成像效果所用半导体芯片（GF108-300-A1，NVIDIA）

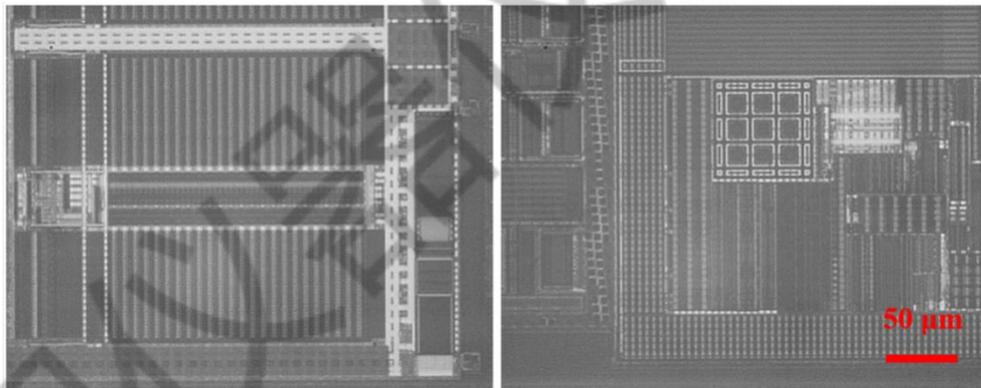


图6 半导体芯片（GF108-300-A1，NVIDIA）内部显微成像图片，拍摄区域位于左图中红色线框内。

我们选用英伟达 GT400 显卡的 GF108-300-A1 芯片进行硅片内部线路拍摄，验证系统的成像质量。图 5 给出了芯片外观，图 6 显示了芯片内部显微成像图片，拍摄区域位于左图中红色线框内，线路表面硅片厚度约 $750\ \mu\text{m}$ 。该芯片采用 $40\ \text{nm}$ 制造工艺，其中心部分线路尺度远小于光学显微镜分辨率，无法观测，芯片边缘区域线宽微米量级的电子线路可清晰成

像。图 6 最右侧一张 3×3 排布的九个小方块的线宽约 1.5 微米，拍摄时清晰可辨，证明系统可以达到瑞利判据推算得到的 1.46 微米的极限分辨率(20 倍物镜,NA 值 0.45,波长 1080 nm)。图片拍摄的积分时间为 20 ms，50 帧的拍摄速度可以保证自动化检测效率。

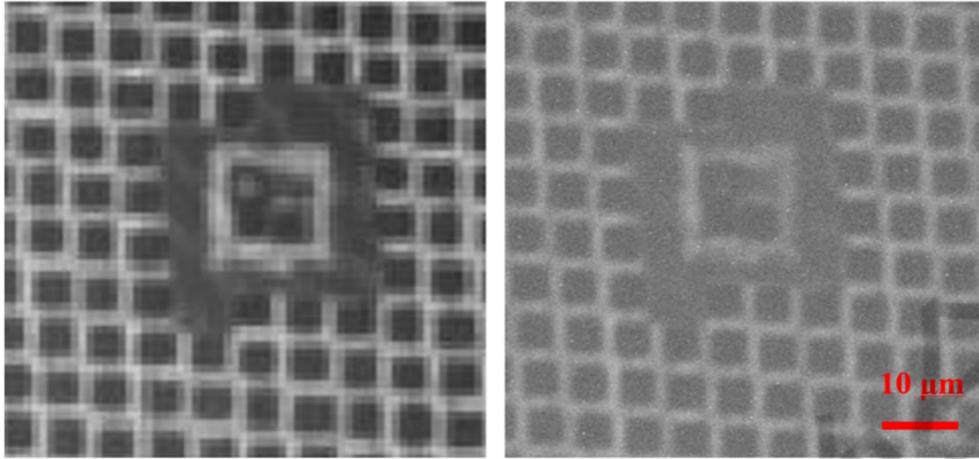


图 7 钢镓砷相机搭配 1200 nm 照明显微成像（左图）与 CMOS 相机搭配 1080 nm 照明显微成像（右图）对比。

图 7 为钢镓砷相机搭配 1200 nm 照明显微成像（左图）与 CMOS 相机搭配 1080 nm 照明显微成像（右图）局部放大图片的对比，拍摄均使用 20 倍显微物镜。拍摄所用 CMOS 相机的像元尺寸为 $5.3\ \mu\text{m} \times 5.3\ \mu\text{m}$ ，钢镓砷相机像元尺寸为 $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 。对比两组图片可以发现，像元尺寸过大的钢镓砷相机拍得的结构边缘出现了明显的锯齿化现象，CMOS 相机由于像素密度更高，结构边缘更加清晰。1080 nm 照明搭配 CMOS 相机拍得的图像衬度稍差，原因是较短波长照明光在硅片前表面反射对成像产生了干扰。

3 结语

本文介绍了用于硅基半导体芯片内部电路检测的近红外显微镜的设计及搭建过程，成功研发了高分辨率近红外显微装置。系统应用近红外增强的 CMOS 相机成像，1080 nm 波段 LED 照明，可实现厚度 0-1.2 mm 硅片内部电子线路的高分辨率（小于 $1\ \mu\text{m}$ ）拍摄。

系统可用于半导体器件失效分析，芯片聚焦离子束取样定位，晶圆键合对准精度检验，太阳能电池板内部缺陷、裂纹检测等半导体工艺流程。在硅基半导体领域存在使用需求，有推广应用的潜力和价值。

参考文献：

- [1] 柯建波. 近期国产半导体设备的观察与思考[J]. 电子工艺技术, 2021, 42(5): 249-254.

- [2]张倩. 关于我国集成电路装备国产化问题的研究 [J]. 电子测量技术. 2019,42(2): 28-32.
- [3] 尹志尧. 认清差距,调整方向,立志赶超! [J]. 集成电路应用. 2014,(12): 10-12.
- [4] 沈从. 中国工程院院士周济: 半导体近期发展还要最大程度基于硅基材料 [N]. 中国电子报, 2021年8月31日(第001版).
- [5] 李丹. 中国集成电路测试设备市场概况及预测 [J]. 电子产品世界. 2019,26(10):4-7+17.
- [6] 饶张飞, 金红霞, 秦凯亮. 晶圆级微纳米栅格标准样片制备及比对测量 [J]. 中国计量. 2021, (08): 86-90.
- [7] 秦静. 半导体器件的检测与失效分析 [J]. 中国安全防范技术与应用. 2018, (06): 34-36.
- [8] 范士海. 半导体器件失效案例统计与综合分析 [J]. 环境技术. 2010,30(05): 50-54.
- [9] 高美静, 范祥瑞, 顾海华, 等. 电子器件无损检测光学微扫描显微热成像系统 [J]. 激光与红外. 2013,43(7): 779-784.
- [10] 翟玉卫, 郑世棋, 刘岩, 等. 半导体器件用显微红外热成像技术原理及应用 [J]. 计测技术. 2018,38(06): 53-60.
- [11] Hansen, M. P., Malchow, D. S. Overview of SWIR detectors, cameras, and applications [J]. International Society for Optics and Photonics, 2008,6939.
- [12] 郭重华, 丁云生, 何悦, 等. 近红外显微成像技术 [J]. 现代仪器. 2009,15(03): 10-13.
- [13] Thimsen, E., Sadtler, B., Berezin, M. Y. Shortwave-infrared (SWIR) emitters for biological imaging: a review of challenges and opportunities [J]. Nanophotonics, 2017,6(5), 1043-1054.
- [14] Martin, T., Brubaker, R., Dixon, P., et al. 640x512 InGaAs focal plane array camera for visible and SWIR imaging [J]. International Society for Optics and Photonics, 2005,5783: 12-20.
- [15] Zhengji Xu, Yuan Dong, Chih-Kuo Tseng, et al. CMOS-compatible all-Si metasurface polarizing bandpass filters on 12-inch wafers, [J]. Optics Express 2019, 27, 26060-26069.
- [16] Manda, S., Matsumoto, R., Saito, S., et al. High-definition Visible-SWIR InGaAs Image Sensor using Cu-Cu Bonding of III-V to Silicon Wafer. [J]. In 2019 IEEE International Electron Devices Meeting, 2019: 16.7.1-16.7.4.
- [17] Oike Y. Evolution of Image Sensor Architectures With Stacked Device Technologies [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021: 1-9.